

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ТЕТРАНИТРАТА  
ПЕНТАЭРИТРИТА С ДОБАВКОЙ КАРБОНИЛСОДЕРЖАЩЕГО ДОПАНТА ДЛЯ  
СОЗДАНИЯ БЕЗОПАСНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТОНАТОРОВ ПОВЫШАЮЩИХ  
БЕЗОПАСНОСТИ БУРО-ВЗРЫВНЫХ РАБОТ**

*А.Е. Счеснова, студент, Н.Н. Ильякова, аспирант, А.С. Зверев, к.ф.-м.н. ст. преподаватель  
ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»  
650000, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел. (3842) 58-39-12  
E-mail: alina.schesnova.96@mail.ru*

**Аннотация:** В работе показана возможность управления порогом фотостимулированного запуска реакции взрывного разложения энергетических материалов путем использования фотоинициатора. В качестве фотоинициатора использовался 2-хлор-1,4-дийод-9,10-антрахинон, применяемый в качестве фотоинициируемого дегидрирующего агента, в матрице тетранитропентаэритрита (энергетический материал). Получены оптические спектры полученного композитного материала и определен порог его лазерного инициирования излучением с длиной волны 532 нм. Показано заметное повышение чувствительности при введении фотоинициатора.

**Abstract:** In work the possibility of management of a threshold of photostimulated start of reaction of explosive decomposition of power materials by use of the photoinitiator is shown. As the photoinitiator it was used 2 - chlorine - 1,4, applied as the photoinitiated dehydrogenating agent, in a tetranitropentaerythritol matrix (power material). Optical spectrums of the received composite material are received and the threshold of its laser initiation by radiation with a wavelength of 532 nanometers is defined. Noticeable sensitization at introduction of the photoinitiator is shown.

**Введение**

Взрыв является незаменимым инструментом добычи минерального сырья, без которых сложно представить современный темп ввода в эксплуатацию объектов добычи минерального сырья. Рациональное применение буровзрывных работ способно значительно снизить издержки предприятия [1,2]. Однако, в тоже время, взрывные работы являются наибольшим источником возможных рисков в плане безопасности, как для персонала, так и для окружающих населенных пунктов и окружающей среды в целом [3,4].

Одним из наиболее важных факторов обеспечивающих безопасность взрывных работ, является гарантированное срабатывание средств инициирования при подрыве заряда и их невосприимчивость к возможным паразитным стимулам при хранении, транспортировке и использовании. Подтверждением данного тезиса является впечатляющее число научных трудов посвященных вопросам исключения из состава инициаторов высокочувствительных инициирующих взрывчатых веществ, либо управление их чувствительности, при сохранении высокой надежности срабатывания

Использование лазерного инициирования открывает новые возможности повышения безопасности и технологичности взрывных работ [1, 2]. Однако реализация этих возможностей тормозится отсутствием высокостабильных взрывчатых составов, обладающих высокой селективной чувствительностью к доступным источникам лазерного излучения для лазерных детонаторов, что объясняет неослабевающий интерес исследователей к данной проблеме [3].

Наиболее очевидным решением проблемы является нагрев прозрачного для излучения энергетического материала за счет введения в его состав светопоглощающих включений. Показано, что введение в матрицу наночастиц металлов позволяет значительно понизить порог инициирования тетранитропентаэритрита (ТЭНа) излучением YAG:Nd лазера [5]. Однако, при таком подходе часть энергии падающего лазерного излучения теряется на нагрев самого включения [11]. Кроме того, вследствие высокой оптической плотности последнего, энергия концентрируется только в приповерхностном слое образца [12].

Фотохимический метод может оказаться более эффективным для инициирования взрывного разложения энергетических веществ, если допустить что он позволит создавать возбужденные неустойчивые, экзотермически распадающиеся, частицы в матрице энергетического материала, за счет прямого поглощения падающего излучения лазера. Гипотеза о возможности реализации фотохимического характера лазерного инициирования ТЭНа высказана в [13].

Для интенсификации фотохимических процессов в ряде случаев оказывается весьма эффективным использование инициаторов – фотохимически активных соединений, способствующих обра-

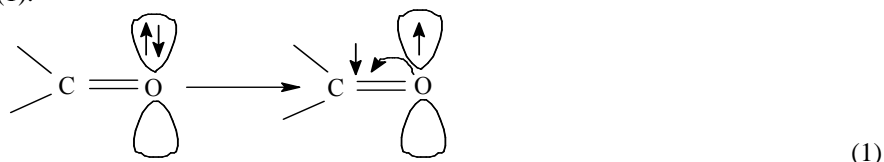
зованию реакционноспособных частиц [14, 15]. Предлагается использование данного подхода для фотоиницирования реакции взрывного разложения. В этом случае при достаточно гомогенном распределении добавки в энергетическом материале можно рассчитывать на дополнительный выигрыш в эффективности инициирования из-за объемного поглощения света в таком композите.

Из большого числа фотоиницирующих соединений следует отметить карбонилсодержащие соединения – ароматические кетоны и хиноны.

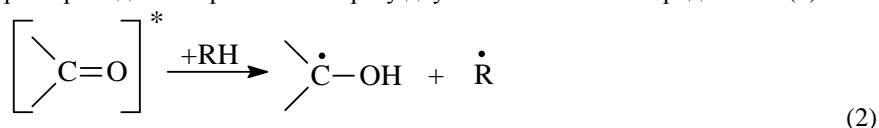
Карбонильная группа  $C=O$  с фотохимической точки зрения – один из важнейших хромофоров. Основное ее преимущество состоит в том, что она активна фотохимически, но вполне устойчива термически.

Поглощая квант света, карбонильная группа переходит в возбужденное состояние, которое может иметь различную природу. С точки зрения фотохимии наибольший интерес представляют  $n-\pi^*$  и  $\pi-\pi^*$  переходы, поскольку они расположены в широкой УФ и видимой областях спектра и, таким образом, могут быть селективно возбуждены в присутствии большого числа других химических групп.

Наибольшую активность проявляет  $n-\pi^*$  - возбужденное состояние, т.к.  $n$ - и  $\pi$ -орбитали взаимодействуют слабо (в силу их ортогональности), что приводит к образованию продукта, имеющего ряд свойств бирадикала (1).



Одной из важнейших его реакций, представляющих наибольший интерес для фотоиницирования различных химических процессов, является дегидрирование - отрыв атома водорода от различных соединений, которое приводит к образованию сразу двух высокоактивных радикалов (2).



В дальнейшем, данные радикалы могут инициировать протекание различных цепных химических процессов.

#### Экспериментальные результаты и обсуждение

В качестве энергетического материала использовался ТЭН (3):



Фотохимическиактивной добавкой, поглощающей лазерное излучение и способствующей инициированию химической реакции являлся 2-хлор-1,4-дифтор-9,10-антрахинон. Его строение приведено ниже (4).



Композит ТЭН-ГАХ в порошкообразном состоянии был получен осаждением водой из раствора ТЭНа с 0,2% ГАХ в ацетоне.

Т. е. для получения максимально гомогенной композиции сухая смесь порошков ТЭН + 0,2% ГАХ растворялась в ацетоне. После этого раствор добавлялся в воду, в которой оба компонента нерастворимы. Полученный осадок отфильтровывался, промывался водой и сушился.

Высушенные порошки прессовались в таблетки толщиной 1 мм и диаметром 3 мм под давлением 200 МПа в стальной оправке толщиной 1 мм (масса навески определялась таким образом, чтобы обеспечить совпадение высоты таблетки с толщиной оправки).

Схема сборки для прессования приведена на рисунке 1.

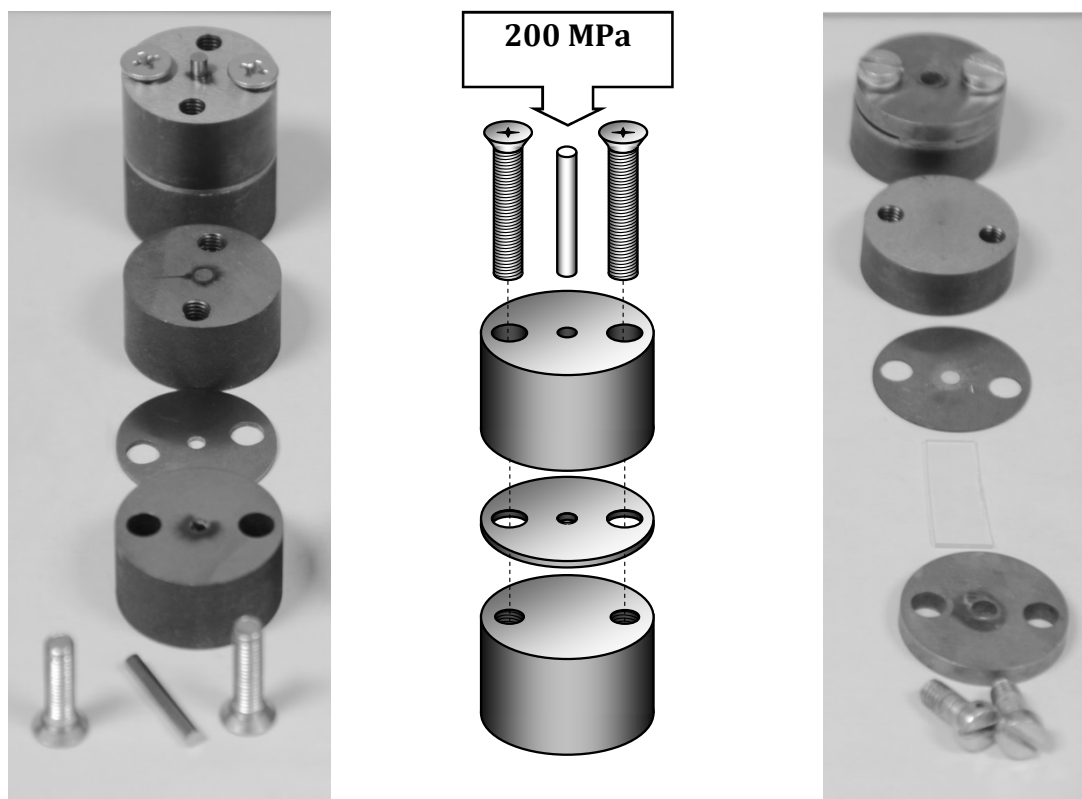


Рис.1. Фото сборки для прессования (слева), схема сборки для прессования (в центре), фото сборки для инициирования (справа).

В качестве источника иницирующего излучения был использован YAG:Nd лазер LDPL10M с генератором второй гармоники (ГВГ), 532 нм, 10 нс. Для оценки поглощения на длине волны лазера были зарегистрированы оптические спектры полученного композита, а также спектр раствора ГАХ в этиловом спирте. С этой целью были подготовлены таблетки толщиной  $\sim 0,3$  мм для регистрации спектров на спектрофотометре ShimadzuUV-1700 в диапазоне 190 - 1100 нм. Таблетки прессовались в стандартной сборке изображенной на рис. выше, но с меньшей массой навески, 14 мг, (не во всю толщину оправки). Оправка с таблеткой устанавливалась в держатель для твердых образцов спектрофотометра. Отдельно регистрировался спектр оправки без образца для учета диафрагмирования. Итоговый спектр получен вычитанием спектра оправки с таблеткой внутри и без нее.

Спектр таблетки представлен на рис. 2 (кривая 1). Слабая полоса поглощения от 480 нм доходит до зеленой области спектра.

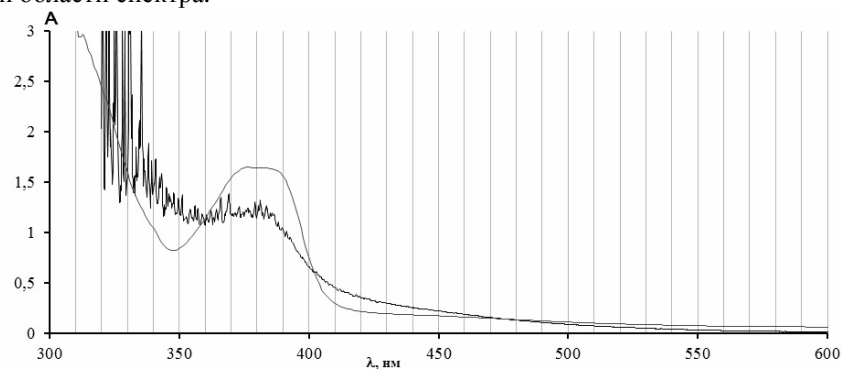


Рис.2. Оптический спектр таблетки прессованного композита ТЭН-ГАХ.

В экспериментах по лазерному инициированию определялась частота взрывов для прессованных образцов чистого ТЭНа и композита ТЭН-ГАХ. Стальные оправки с запрессованной внутрь таблеткой помещались между стальным основанием и стеклянной пластиной, прижимаемой стальным кольцом с помощью винтов и инициировалась лазером аналогично методике, описанной в [6]. Регистрация сигнала от акустического датчика осуществлялась при помощи осциллографа Tektronix TDS3032B. Схема установки приведена на рис. 3.

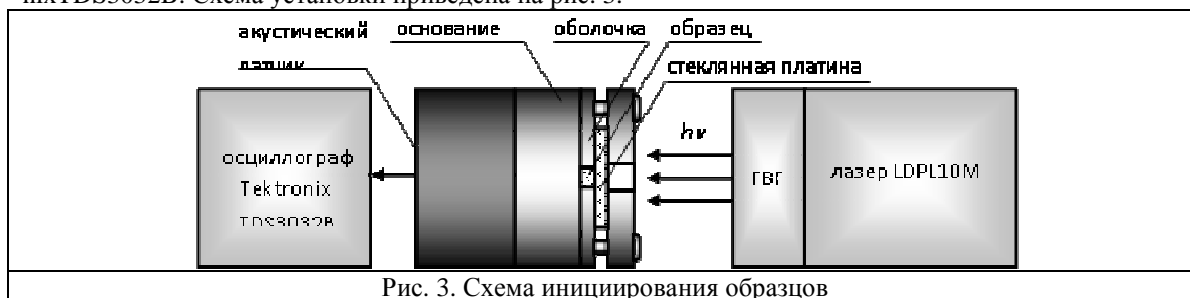


Рис. 3. Схема инициирования образцов

В результате эксперимента были построены зависимости (вероятностные кривые) частоты взрыва (доли успешно инициированных образцов) от плотности энергии инициирующего импульса. Для этого, производилось для каждой испытываемой плотности энергии производилось лазерное инициирование 10ти образцов с регистрацией самого факта взрыва (по результатам осмотра взрывной сборки), и осциллограмм акустического импульса.

В ходе эксперимента наблюдалось три результата инициирования единичного образца:

1. Отсутствие взрыва, при этом закрывающая стеклянная пластина, как правило, остается целой, образец мутнеет, на осциллографе наблюдается достаточно слабый акустический сигнал, вызванный протекающей экзотермической реакцией, не перешедшей в самоподдерживающийся режим (однако, значительно превышающий уровень сигнала (на несколько порядков), если бы он был обусловлен исключительно поглощенной энергией лазерного импульса, образцом или деталями сборки).
2. Частичный взрыв образца, при котором наблюдается разрушение закрывающей стеклянной пластины и частичный вылет образца. Осциллограмма акустического сигнала имеет тот же характер, что и в случае полного взрыва (нижеописанный результат инициирования), но амплитуда может быть слабее. Такой результат не рассматривался как взрыв при расчете частоты.
3. Взрыв, при котором регистрировался интенсивный акустический отклик и не наблюдалось остатков образца в оправе.

Акустический сигнал для каждого случая приведен на рис.4. При воздействии на пустую сборку без образца, амплитуда акустического сигнала на три порядка ниже, чем наблюдаемая в эксперименте.

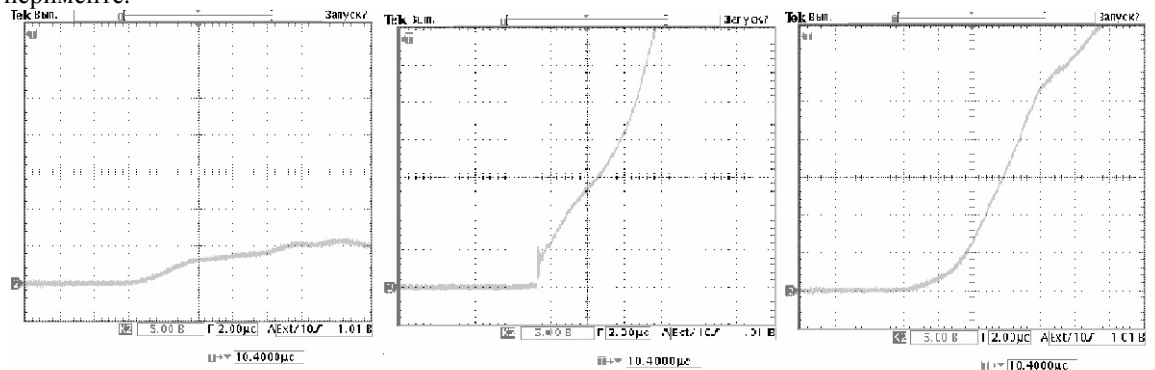


Рис. 4. Акустический отклик при инициировании образцов при  $H = 2,84 \text{ Дж/см}^2$ . 1 – нет взрыва, 2 – взрыв поверхности, 3 – полный взрыв.

Вероятностные кривые представлены на рис.5. Они представляют зависимость доли полностью взорвавшихся образцов (3-й случай) от плотности энергии инициирующего импульса лазера.

Каждая точка вероятностной кривой представляет долю взорвавшихся образцов (минимум 10 испытанных образцов) при данной плотности энергии.

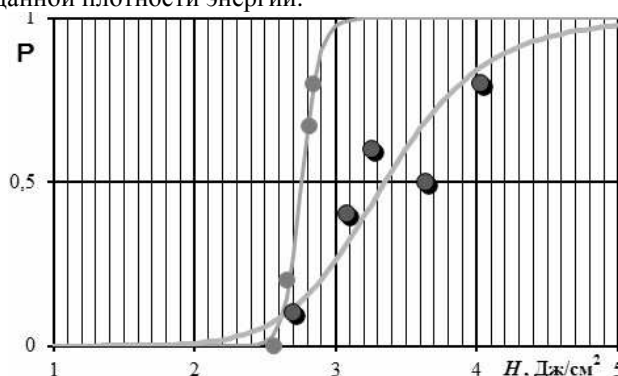


Рис. 5. Вероятностные кривые инициирования чистого ТЭНа (1) и композита ТЭН-ГАХ (2).

Порог инициирования, соответствующий плотности энергии, при которой наблюдалась 50% вероятности подрыва образца, для чистого ТЭНа составил  $3,3 \text{ Дж/см}^2$ , для композита ТЭН-ГАХ –  $2,77 \text{ Дж/см}^2$ .

Полученный результат может быть сопоставлен с [16], где проведено аналогичное исследование композита ТЭНа с добавкой 9,10-фенантренина, где также наблюдалось заметное понижение порога лазерного зажигания ТЭНа.

Предполагается, что причиной этого является фотодегидрирование фотоинициатором молекул ТЭНа [16] с образованием высокоактивных радикалов, распад и дальнейшие химические реакции которых приводят к запуску взрывного разложения образца.

Заметное понижение порога инициирования свидетельствует о перспективности использования описанного подхода к управлению чувствительностью энергетических материалов к лазерному инициированию.

#### Выводы

Изложенные выше результаты, позволяют рассматривать введение в матрицу малочувствительных энергетических материалов фотохимически активных соединений как перспективный метод селективного управления чувствительностью последнего именно к лазерному излучению. И главной задачей последующих исследований будет являться поиск активных инициаторов, соответствующих требованиям эффективного поглощения на длине волны лазера с хорошим квантовым выходом реакционно-способного фотовозбужденного состояния. Также следует отметить, что изучение механизмов указанных выше процессов, поможет углубить представления о химизме взрывного разложения энергетических материалов.

#### Литература.

1. Быстрое инициирование ВВ. Особые режимы детонации / Сб. научн. статей под ред. В.И. Таржанова. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998. 168с.
2. Rubenchik A.M. // Propellants, Explosive, Pyrotechnics. 2007. V. 32. No. 4. P. 296.
3. Ahmad S.R., Cartwright M. Laser Ignition of Energetic Materials. Chichester: John Wiley & Sons, 2014. 284 p.
4. Александров Е.И., Вознюк А.Г., Ципилев В.П. // ФГВ. 1989. Т.25. № 1. С. 3.
5. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Фурега Р.И. и др. // Хим. физика. 2013. Т.32. № 8. С. 39.
6. Алукер Э.Д., Зверев А.С., Кречетов А.Г. и др. // Хим. физика. 2014. Т.33. № 9, С. 52.
7. Илюшин М.А., Целинский И.В., Угрюмов И.А. и др. // Хим. физика. 2005. Т.24. № 10. С. 49.
8. Goveas S.G. The laser ignition of energetic materials. Diss. University of Cambridge, 1997.
9. Paisley D.L. Proc. 9th Symp. (Int.) on Detonation, 1989, P. 1110.
10. Bourne N.K. // Proc. R. Soc. Lond. A. 2001. V.457. No. 2010. P. 1401.
11. Aluker E.D., Kretchov A.G., Mitrofanov A.Yu. et al. // J. Phys. Chem. C. 2012. V.116, No. 46, P. 24482.
12. Zverev A.S., Mitrofanov A.Yu., Kretchov A.G., et al. // Proc. 18th Int. Seminar New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice (Czech Republic). 2015, P. 933.
13. Алукер Э.Д., Алукер Н.Л., Кречетов А.Г. и др. // Хим. физика. 2011. Т.30. № 1. С. 48.

14. Крюков А.И., Шерстюк В.П., Дилунг И.И. Фотоперенос электрона и его прикладные аспекты. Киев: Наукова думка, 1982. 239 с.
15. Kaur M., Srivastava A.K. // J. Macromol. Sci. C. 2002. V. 42. No. 4.P. 481.
16. Tsyshevsky R. et al. Role of Hydrogen Abstraction Reaction in Photocatalytic Decomposition of High Energy Density Materials //The Journal of Physical Chemistry C. – 2016. – V. 120. – №. 43. – P. 24835-24846.

### ПРОБЛЕМА ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

*М.С. Лебедева, студент, Ю.В. Бородин, к.т.н., доц.*

*Томский политехнический университет,*

*634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30*

*E-mail: [msl7@tpu.ru](mailto:msl7@tpu.ru)*

**Аннотация:** В статье рассмотрена такая проблема, как постоянное накопление радиоактивных отходов, а также невозможность окончательного изолирования данных материалов в хранилища.

По состоянию на 2017 год в Томской области накоплено более 1 миллиона м<sup>3</sup> радиоактивных отходов, а по всей территории России более 500 миллионов м<sup>3</sup>. До недавнего времени была принята практика долговременного хранения отходов и отложенного решения вопросов их окончательного изолирования. В настоящее время более 60% твердых радиоактивных отходов находятся во временных хранилищах. Именно поэтому, решение проблем ядерного наследия и обеспечения ядерной безопасности населения и окружающей среды на тысячелетия – серьезная техническая, экономическая, а главное, социальная задача.

Одним из основных решений этой проблемы является строительство постоянных пунктов изоляции радиоактивных отходов. Безопасность объектов обеспечивается за счет последовательной реализации концепции глубоководной защиты, основанной на применении системы физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду. Данный метод снизит возможность радиоактивного заражения местности до минимальных значений.

**Abstract:** The article considers the problem of permanent accumulation of radioactive waste, as well as the impossibility of final isolation of these materials in storage facilities.

As at 2017 the Tomsk region received more than 1 million m<sup>3</sup> of radioactive waste, and throughout Russia more than 500 million m<sup>3</sup>. Until recently, the practice of long-term waste storage and deferred the addressing issues of their final isolation was adopted. Currently, more than 60% of solid radioactive waste is in temporary storage. That is why the addressing problems of the nuclear and material world is a serious technical, economic, and, most importantly, social task.

One of the main solutions to this problem is the construction of permanent radioactive waste disposal sites. The security of facilities is ensured by the consistent concept implementation of defense in depth, based on the application of a system of physical barriers to the spread of ionizing radiation and radioactive substances into the environment. This method will reduce the possibility of radioactive contamination of the territory to the minimum values.

С начала открытия радиоактивности началось стремительное развитие и изучение данной области. Использование ядерной энергии в мирных и военных целях делает приоритетным обеспечение радиационной безопасности человека и среды его обитания.

Ни для кого не секрет, что при обращении с радиоактивными веществами образуются жидкие, твердые, газообразные отходы. Данные отходы классифицируют отдельно от бытовых и производственных отходов, так как радионуклиды, содержащиеся в материалах, могут иметь период полураспада более 1000 лет и представлять угрозу для жизни людей и всему окружающему его миру. Именно эта проблема, проблема постоянного накопления отходов, была поднята на конференции в Рио-де-Жанейро в 1992 году и остается актуальной по сей день.

Основной объем накопленных радиоактивных отходов образовался в результате реализации военных ядерных оружейных программ СССР. Первоначально, считалось, что достаточной мерой является рассеяние радиоактивных изотопов в окружающей среде, по аналогии с отходами производства в других отраслях промышленности. На предприятии «Маяк» в первые годы работы все радио-